

# Pengaruh Kecepatan Angin pada Karakteristik Performansi Konduktor SUTET

Suprihadi Prasetyono

shabri\_prasetyo@yahooo.com  
Universitas Jember

## Abstrak

*Perubahan kecepatan angin terhadap konduktor SUTET selain memberikan pengaruh pendinginan sehingga kemampuan hantar arus saluran meningkat juga akan memberikan pengaruh terhadap unjuk kerja konduktor. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh kecepatan angin terhadap unjuk kerja konduktor yang meliputi temperatur, panjang, tegangan tarik (tension), andongan, dan kemampuan hantar arus konduktor. Dari hasil analisis perhitungan yang dilakukan disimpulkan bahwa kecepatan angin dapat digunakan sebagai pendinginan konduktor. Pendinginan berkisar antara 1 - 3 derajat celcius setiap kenaikan 0,5 m/s. Sedangkan kareakteristik mekanis konduktor meliputi panjang, tegangan tarik, dan andongan cenderung tidak mengalami perubahan yang signifikan.*

**Kata kunci** — Karakteristik mekanis, Saluran transmisi, konduktor.

## Abstract

*Wind speed changes at SUTET conductor besides having cooling effects it also improves the transmission line capacities and will give influence to conductor performances. This research aimed to know the influence of the wind speed to performance conductor characteristics such as temperature, tension, length, sag and current carrying capacity of conductor. As simulation model, an extra high voltage transmission line 500kV Paiton – Kediri span no 10 is used. Temperature of Conductor is calculated based on hot-balance equation, whereas Catenary method and Rulling span method used to determine sag conductor and length. The result of calculation shows, that the wind speed can be used to cool conductor with the range from 1 - 3 degree of celcius each for every increase of wind speed for 0,5 m / s. While conductor mechanical characteristics such as tension, length, and sag does not having any significant changes.*

**Keyword** : Mechanical performance, Transmission line, Conductor.

## I. PENDAHULUAN

Konduktor adalah salah satu komponen utama saluran transmisi yang berfungsi untuk menyalurkan arus dari satu bagian ke bagian yang lain dan juga untuk menghubungkan bagian-bagian yang dirancang bertegangan sama. Konduktor yang biasa digunakan untuk saluran udara pada saat ini adalah

kawat almunium dari jenis ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforce*) yaitu kawat berlilit dengan inti serat baja ditengah yang dikelilingi oleh lapisan-lapisan serat aluminium [7]. Konduktor konvensional ini mempunyai batas temperatur yang diijinkan tidak melebihi 75°C pada pembebanan harian dan pada keadaan beban darurat boleh meningkat sampai 90°C [8].

Beberapa penelitian mengenai unjuk kerja mekanis konduktor saluran transmisi udara telah banyak dilakukan antara lain, penelitian tentang pengaruh perubahan lingkungan dan kecepatan angin terhadap unjuk kerja mekanis saluran transmisi udara pada konduktor konvensional menggunakan metode *rulling span* dilakukan oleh Seppa. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa rating saluran transmisi dipengaruhi oleh temperatur lingkungan dan kecepatan angin. Apabila temperatur lingkungan meningkat, menyebabkan menurunnya kemampuan hantar arus, sementara apabila kecepatan angin bertambah, menyebabkan kemampuan hantar arus bertambah [2].

Kemampuan hantar arus saluran transmisi merupakan fungsi elektris, mekanis dan termis dari konduktor dan alat-alat pendukungnya, demikian dipaparkan oleh Jakubiak dan Matusz. Arus maksimum dari saluran dibatasi oleh penurunan kekuatan konduktor, andongan dan batas temperatur yang diperbolehkan dari alat-alat pendukungnya. Melalui pengujian laboratoris, studi ini menunjukkan bahwa peralatan pendukung saluran transmisi dapat dioperasikan dengan aman sampai pada temperatur 200°C [5].

Kriteria unjuk kerja mekanis penghantar adalah penghantar harus tahan terhadap perubahan temperatur dan harus tahan terhadap segala gaya-gaya atau tekanan/tarikan yang ada padanya akibat pembebanan mekanik maupun elektrik. Arus yang diperbolehkan (*allowable current*) untuk saluran transmisi udara dibatasi oleh kenaikan suhu yang disebabkan oleh mengalirnya arus dalam saluran tersebut. Pemuluran (*creep*) dan andongan (*sag*) yang terjadi tidak boleh melebihi batas aman dari ruang dan jarak bebas minimum (*Clearence*) [1]. Dengan mengetahui pengaruh perubahan kecepatan angin terhadap unjuk kerja konduktor ACSR yang meliputi tegangan tarik konduktor, andongan dan panjang pemuluran konduktor, diharapkan akan berguna dalam perencanaan dan pembangunan struktur konstruksi saluran transmisi udara yang sesuai dengan sifat dari konduktor ACSR.



## II. TINJAUAN PUSTAKA

Apabila sebuah kawat konduktor dibentangkan antara dua buah titik ikat, konduktor tidak akan mengikuti garis lurus, akan tetapi karena beratnya sendiri akan melengkung kebawah. Besar lengkungan ini tergantung berat dan panjang kawat konduktor. Berat konduktor akan menimbulkan tegangan tarik pada penampang kawat konduktor. Kalau tegangan tarik ini besar dapat menyebabkan kawat konduktor putus, atau dapat merusak menara penyangga. Tegangan tarik tergantung dari berat konduktor dan beban-beban lain yang bekerja pada kawat konduktor, misalnya angin, es dan temperatur.

Menurut hukum Stokes, karena adanya tegangan tarik ini, konduktor akan bertambah panjang, tergantung modulus elastisitas dan panjang konduktor itu sendiri. Sedang karena perubahan-perubahan temperatur yang terjadi di sekitar konduktor, akan menyebabkan memuai atau menyusut tergantung besarnya perubahan temperatur, koefisien muai dan panjang konduktor. Panjang konduktor ditentukan oleh panjang gawang (*span*) dan besarnya andongan (*sag*). Sebaliknya, andongan tergantung dari panjang konduktor, tegangan tarik dan temperatur konduktor dan ketiga besaran ini saling mempengaruhi satu sama lain.

Dengan mempertimbangkan tegangan kerja kawat konduktor yang tinggi, besar andongan akan mempengaruhi perencanaan ketinggian tower agar aman bagi manusia ataupun obyek lain, yakni jarak bebas antara konduktor terendah dengan permukaan tanah atau terhadap benda-benda yang dilalui. Jarak bebas untuk tegangan 100 kV adalah 6 meter dan apabila melalui jalan adalah sebesar 7 meter [3]. Besar jarak bebas untuk tegangan yang lebih besar dari 100 kV harus ditambah dengan :

$$\Delta h = \frac{V - 100}{150} \quad (1)$$

dengan :  $\Delta h$  = penambahan jarak bebas (m)

$V$  = Tegangan (kV)

sehingga diperoleh ketinggian tower :

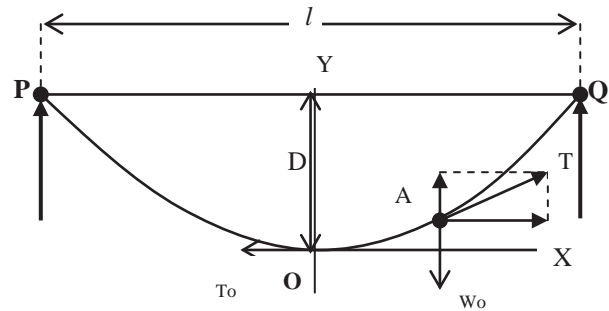
$$h = D_m + 7 + \Delta h + t \quad (2)$$

dengan :  $h$  = tinggi tower (m)

$D_m$  = andongan maksimum (m)

$t$  = tinggi yang dilewati (m)

### A. Perhitungan Tegangan Tarik dan Andongan Konduktor



Gbr. 1 Konduktor yang dibentangkan pada dua menara

dengan :

$L$  = Panjang kawat penghantar

$l$  = Lebar gawang (span)

$D$  = Andongan (sag)

$w$  = Berat kawat penghantar per satuan panjang

$T$  = Kuat tarik pada titik A.

$T_0$  = Kuat tarik pada titik O (tegangan tarik horisontal)

Jika ditinjau busur kecil misalnya  $S = OA$ , maka berat kawat penghantar sepanjang busur  $S$  adalah  $ws$ , pada busur  $S$  akan bekerja gaya-gaya  $T$ ,  $ws$  dan  $T_0$ .

Untuk menghitung tegangan tarik dan andongan pada kawat konduktor dapat diperoleh dari persamaan (*metode Catenary*) dibawah ini [3] :

$$\sigma_{t2}^3 + A\sigma_{t2}^2 = B \quad (3)$$

$$A = \frac{l^2 \delta_m^2}{24\sigma_{t1}^2} E + \alpha E(t_2 - t_1) - \sigma_{t1} \quad (4)$$

$$B = \frac{l^2 \delta_m^2 E}{24} \quad (5)$$

dengan :  $l$  = panjang kawat penghantar (m)

$\delta_m$  = berat total spesifik kawat ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$ ).

$\Delta t$  =  $t_2 - t_1$  = perubahan temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

Tegangan tarik yang terjadi tidak boleh melebihi tegangan tarik nominal kawat pada keadaan temperatur  $t_1$ , sehingga,

$$\sigma_{t1} = \frac{T}{k \cdot q} \quad (6)$$

dengan :  $T_r$  = tegangan tarik nominal penghantar (kg)

$\sigma_{t1}$  = teg. tarik spesifik permulaan ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$ )

$k$  = faktor keamanan (2 - 5)

$q$  = luas penampang penghantar ( $\text{mm}^2$ )

Dengan demikian tegangan tarik horizontal pada temperatur  $t_2$  dapat dihitung sebagai berikut :

$$T_{ot2} = \sigma_{t2} \cdot q \quad (7)$$



Tegangan tarik pada temperatur  $t_2$  adalah :

$$T_{t2} = T_{ot2} + \frac{l^2 w^2}{8T_{ot2}} \quad (8)$$

Panjang kawat penghantar pada temperatur  $t_2$  adalah :

$$L_{t2} = l + \frac{l^3 w^2}{24T_{ot2}} \quad (9)$$

Andongan pada temperatur  $t_2$  adalah :

$$D_{t2} = \frac{l^2 w}{8T_{ot2}} \quad (10)$$

dengan :  $L$  = lebar gawang (*span*) (m)

$D$  = andongan (*sag*) (m)

$w$  = berat kawat penghantar per satuan panjang ( $\text{kg.m}^{-1}$ )

$T$  = tegangan tarik konduktor (kg)

$T_o$  = tegangan tarik horizontal konduktor (kg)

### B. Perhitungan Temperatur Konduktor

Perhitungan kapasitas hantar arus pada saluran transmisi udara menurut IEEE Std.738 (1993) memenuhi persamaan keseimbangan panas yaitu panas yang dibangkitkan oleh konduktor (panas rugi-rugi listrik + panas penyerapan matahari) sama dengan panas yang dilepaskan konduktor secara konveksi dan radiasi [4].

$$W_e + W_s = W_c + W_r \quad (11)$$

$$\text{Untuk, } W_e = I^2 R \text{ (Watt/meter)} \quad (12)$$

dengan :  $W_e$  = rugi listrik

$I$  = Arus penghantar (A)

$R$  = Tahanan (Ohm/meter)

Panas yang diserap dari matahari  $W_s$  diberikan oleh :

$$W_s = \alpha.E.d_c \text{ (Watt/meter)} \quad (13)$$

dengan :  $\alpha$  = Koefisien serap matahari (1 untuk konduktor lama, 0,6 untuk konduktor baru).

$E$  = Intensitas radiasi matahari (1000 – 1500  $\text{Watt/m}^2$ )

$d$  = Diameter konduktor (meter)

Panas menyebar dari penghantar dengan cara radiasi dan konveksi.

(a) Radiasi : Panas yang disebarkan secara radiasi sesuai dengan hukum Stefan Boltzman yang menyatakan bahwa jumlah panas tersebar oleh radiasi berbanding pangkat empat dari suhu mutlak penghantar.

$$W_r = \sigma.e(T_c^4 - T_a^4)\pi.d_c \text{ (Watt/m)} \quad (14)$$

dengan :  $\sigma$  = konstanta Stefan Boltzman ( $5,702 \times 10^{-8} \text{ Watt/m}^2$ )

$e$  = emisivitas relatif permukaan konduktor yang bernilai antara 0,2-1,0 (untuk benda hitam = 1 dan Al atau Cu = 0,5)

$T_c$  = temperatur konduktor ( $^{\circ}\text{K}$ )

$T_a$  = Temperatur sekeliling (*ambient temperature*) ( $^{\circ}\text{K}$ )

Atau dapat dituliskan menjadi :

$$W_r = 17,9 \times 10^{-8} e(T_c^4 - T_a^4)d_c \quad (15)$$

b) Konveksi : Penyebaran panas secara konveksi, hubungan umumnya adalah :

$$W_c = 5.73 \sqrt{pV_m/d_c} \Delta t \text{ (Watt/m}^2\text{)} \quad (16)$$

dengan :  $p$  = tekanan udara (atm)

$V_m$  = kecepatan angin (m/detik)

$\Delta t$  = kenaikan temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

Sehingga dari persamaan (11) menjadi :

$$I^2 R + \alpha.E.d_c = 18.\Delta t. \sqrt{p.V_m.d_c} + 17,9 \cdot 10^{-8} e(T_c^4 - T_a^4)d_c \quad (17)$$

### C. Metode span ekivalen (*Rulling Span*)

Metode *rulling span* berguna untuk menghitung andongan dan tegangan tarik pada struktur dua *dead end* yang terdiri atas multi span yang berjarak tak sama. Jika ada  $n$  span dengan panjang  $L_1, L_2, L_3, L_4, \dots, L_n$  pada setiap bagian dan  $L_e$  adalah ekuivalen span atau dinamakan *rulling span* pada setiap bagian [9]. Panjang total dari jarak antar menara adalah :

$$L_e = (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + \dots + L_n)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{L_1^3 + L_2^3 + L_3^3 + \dots + L_n^3}{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n}} \quad (18)$$

### D. Pengaruh Temperatur

Panjang konduktor bergantung kepada perubahan temperatur konduktor, apabila temperatur konduktor meningkat maka akan menyebabkan pemuluran (*creep*) konduktor [3].

Misalkan :

$l_o$  = panjang kawat tidak ditegang pada  $0^{\circ}\text{C}$ .

$l_t$  = panjang kawat tidak ditegang pada temperatur  $t^{\circ}\text{C}$ .

$L_o$  = panjang kawat ditegang pada  $0^{\circ}\text{C}$ .

$L_t$  = panjang kawat ditegang pada  $t^{\circ}\text{C}$ .

$\alpha$  = koefisien muai panjang.

$\epsilon_t$  = perpanjangan ideal kawat karena tegangan pada  $t^{\circ}\text{C}$ .

$E$  = modulus elastisitas kawat.

$t$  = temperatur kawat  $^{\circ}\text{C}$ .

$\sigma_t$  = tegangan spesifik kawat pada  $t^{\circ}\text{C}$ .

Maka ,  $l_t = l_o (1 + \alpha t_1)$  dan

$$l_{t2} = l_o (1 + \alpha t_2)$$

Perubahan panjang kawat karena perubahan temperatur,

$$l_{t2} - l_{t1} = l_o.\alpha(t_2 - t_1)$$

Perubahan temperatur akan menyebabkan perubahan tegangan (*stress*) dalam kawat sesuai dengan hukum Hooke,

$$L_t = l_t (1 + \epsilon_t) = l_t (1 + \sigma_t/E)$$

$$= l_o (1 + \alpha_t) (1 + \sigma_t/E)$$



Perubahan kawat yang ditegang karena perubahan temperatur dari  $t_1$  ke  $t_2$  adalah :

$$L_{t_2} - L_{t_1} = l_0(1 + \alpha t_2)(1 + \sigma_{t_2}/E) - l_0(1 + \alpha t_1)(1 + \sigma_{t_1}/E) \quad (19)$$

Suku baris kedua dari persamaan terakhir ini kecil sekali sehingga dapat diabaikan. Jadi secara pendekatan,

$$L_{t_2} - L_{t_1} = l_0 [\alpha(t_2 - t_1) + \frac{1}{E} (\sigma_{t_2} - \sigma_{t_1})] \quad (20)$$

#### E. Pengaruh Tekanan Angin

Tekanan angin akan mempengaruhi berat spesifik kawat. Berat sendiri kawat bekerja vertikal sedang tekanan angin dianggap seluruhnya bekerja horizontal. Jumlah vektoris kedua gaya ini menjadi berat total spesifik kawat [3]. Tekanan angin dinyatakan oleh :

$$P = f \cdot p \cdot F \quad (21)$$

dengan :

$P$  = tekanan angin (kg)

$f$  = factor bentuk.

$p$  = tekanan angin spesifik (kg/mm<sup>2</sup>)  
 $= v^2/16$  kg/mm<sup>2</sup>

$v$  = kecepatan angin (m/dt)

$F$  = Luas permukaan kawat yang tegak lurus arah angin (m<sup>2</sup>)

Karena tekanan angin tidak merata maka digunakan koefisien ketidaksamaan ( $d=0.75$  di Indonesia) [3], jadi :

$$P = f \cdot d \cdot p \cdot F \quad (22)$$

dengan  $p$  bergantung dari tinggi kawat penghantar diatas permukaan tanah dan  $f$  bergantung dari diameter kawat penghantar.

Nilai dari  $F$  diambil = panjang kawat dikalikan dengan diameter kawat konduktor. Sehingga berat total spesifik kawat penghantar (Kg/m/mm<sup>2</sup>) adalah sebagai berikut:

$$\delta_m = \sqrt{\delta^2 + \delta_w^2} \quad (23)$$

dengan :

$\delta_w$  = tekanan angin spesifik  
 $= P/q$  (kg.m<sup>-1</sup>.mm<sup>-2</sup>).

$\delta$  = berat sendiri spesifik kawat  
 $= W/q$  (kg.m<sup>-1</sup>.mm<sup>-2</sup>).

$\delta_m$  = berat total spesifik kawat (kg. m<sup>-1</sup>.mm<sup>-2</sup>).

### III. METODE

Penelitian dilakukan dengan menghitung besar temperatur, pemuluran konduktor dan andongan yang terjadi akibat perubahan kecepatan angin. Perhitungan dan simulasi dilakukan dengan menggunakan alat bantu perangkat lunak (software) Matlab, serta diagram alir program seperti pada gambar 2. Sebagai model simulasi digunakan saluran transmisi udara tegangan ekstra tinggi 500kV jalur Paiton – Kediri Span no 10 yang memiliki dua *dead end* [6].

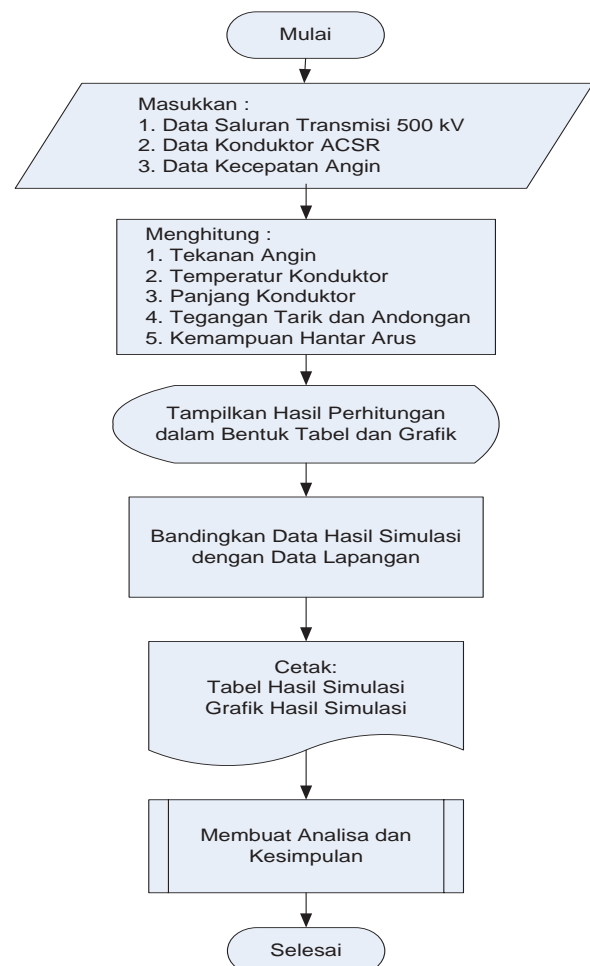
Data Kecepatan Angin dari BMG Juanda Surabaya

- tinggi alat ukur kecepatan angin (anemometer) diatas permukaan laut adalah 2,8 meter.

- kecepatan angin rata-rata per tahun adalah 3,925 m/s

TABEL III  
DATA SPESIFIKASI KONDUKTOR ACSR

No.	Spesifikasi	Nilai
1	Panjang sirkit	2 x 144,24 km
2	Panjang rute	145 km
3	Jenis ACSR	ACSR Gannet
4	Diameter konduktor	25,75 mm
5	Luas penampang	392,80 mm <sup>2</sup>
6	Ratio Al/Steel	26/7
8	Diameter aluminium	4,067 mm
9	Diameter baja	3,162 mm
10	Tegangan kawat	2380 kg
11	Jumlah per-fasa	4
12	Jumlah spacer per-fase	8
13	Jarak gawang rata-rata	250 m
14	Berat konduktor per-kilometer	1300 kg
15	Tahanan maksimal/km/20°C	0,08551 Ω
16	Modulus Elastisitas	8,360x10 <sup>3</sup> kg/mm <sup>2</sup>
17	Koefisien muai panjang	18,9 x 10 <sup>-6</sup> /°C
18	Batas temperatur operasi maks.	90 <sup>0</sup> C
19	Jarak span no 10	380,2m



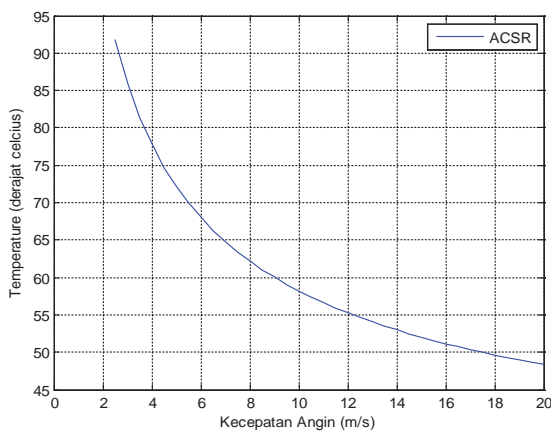
Gbr. 2 Diagram Alir Program.

## IV. HASIL DAN DISKUSI

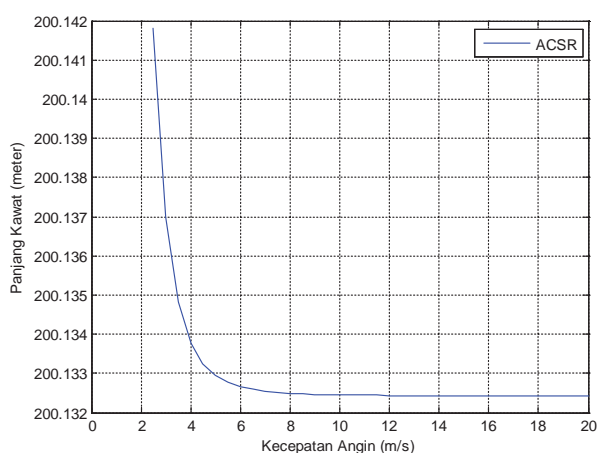
Dari hasil simulasi program perhitungan pada gambar 3 terlihat, semakin besar kecepatan angin maka akan menyebabkan temperatur konduktor semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan angin dapat memberikan efek sebagai pendingin konduktor. Pendinginan berkisar antara 1-3 derajat celsius setiap kenaikan kecepatan angin 0,5 m/s, hal ini terjadi pada nilai kecepatan angin dari 4 m/s sampai 12 m/s.

Sedangkan dari gambar 4,5 dan 6 didapatkan bahwa panjang konduktor, tegangan tarik, andongan (*sag*) relatif konstan terhadap perubahan kecepatan angin yang terjadi. Pemuluran (*creep*) kawat konduktor, perubahan nilai andongan dan tegangan tarik akibat kenaikan temperatur dan pembebanan mekanik maupun elektrik pada saluran transmisi udara tidak terjadi. Perubahan besarnya andongan yang terjadi berkisar antara 0,001 cm – 0,5 cm pada kecepatan angin dari 4,5 m/s - 15 m/s.

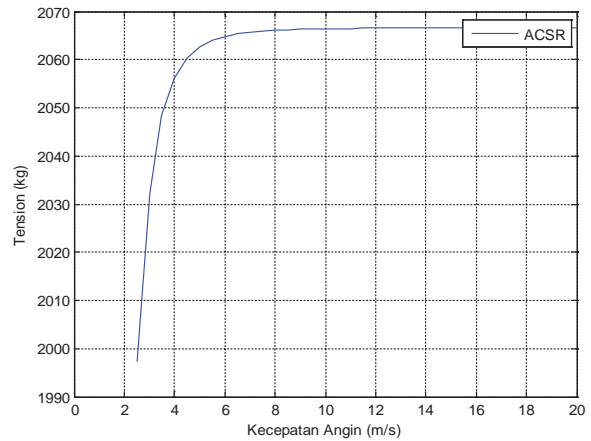
Dari grafik hasil simulasi pada gambar 7 terlihat bahwa semakin besar kecepatan angin yang terjadi, maka akan meningkatkan besar kemampuan hantar arus pada konduktor tersebut.



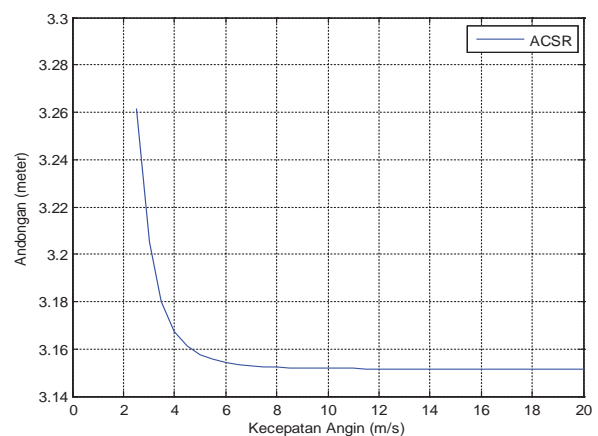
Gbr. 3 Grafik Hubungan Antara Perubahan Kecepatan Angin Terhadap Temperatur Konduktor.



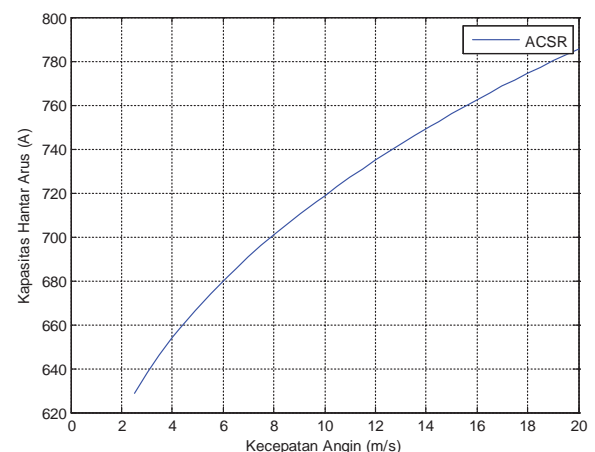
Gbr. 4 Grafik Hubungan Antara Perubahan Kecepatan Angin Terhadap Panjang Kawat Konduktor.



Gbr. 5 Grafik Hubungan Antara Perubahan Kecepatan Angin Terhadap Tegangan Tarik Konduktor.



Gbr. 6 Grafik Hubungan Antara Perubahan Kecepatan Angin Terhadap Andongan Konduktor.



Gbr. 7 Grafik Hubungan Antara Perubahan Kecepatan Angin Terhadap Kemampuan Hantar Arus.





## V. KESIMPULAN

- Kecepatan angin dapat digunakan sebagai pendingin temperatur konduktor, pendinginan berkisar antara 1-3 derajat celcius setiap kenaikan 0,5 m/s. Kenaikan kapasitas hantar arus konduktor berkisar antara 2,6 sampai 6,6 ampere terjadi pada saat kecepatan angin 4,5 m/s sampai 20 m/s.
- Besar perubahan kecepatan angin tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai tegangan tarik, andongan, dan panjang kawat konduktor

## REFERENSI

- [1] Electric Power Research Institute. *Transmission Line Reference Book 345 KV and .Above*. Second edition. 1982
- [2] Dauglass, D.A., Motlis,Y. dan Seppa,T.O. *IEEE'S Approach For Increasing Transmission Line Ratings in North America*. 2003.
- [3] Hutaaruk, T.S. *Transmisi Daya Listrik*, Erlangga. Jakarta. 1999.
- [4] IEEE Std. 738. *Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*, IEEE Power Engineering Society. 1993.
- [5] Jakubiak,E.A., dan Matusz,J.S.. *High Temperature Tests of ACSR conductorHardware*, IEEE Transactions on Power Delivery. Vol.4. No.1. January 1989
- [6] PT. PLN. *Lot 1 : Paiton - Kediri*. 500kV Transmission Lines Paiton – Krian Projects. Vol.3. 1997.
- [7] Stevenson, Jr., William, D. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, Erlangga. Jakarta.1990
- [8] SPLN 41 – 7. *Hantaran Aluminium Berpenguatan Baja*.1981
- [9] Thayer, E.S. *Computing Tension in Transmission Line*. *Electrical World Magazine*. pp. 72-73.1924.

